

爆発圧着した金属の耐食性について

星 光 陸・滝 沢 雄*

1. 緒 言

1954年初頭、Allen と Wilson は鉛板に平頭弾丸を角度をもたせて打ち込むとその衝撃表面に一連の“さざ波”が発生することを見出した¹⁾。しかしこの時 Allen 等は、互に衝撃する2金属間に圧着現象のあり得ることまでは気づかなかつた。1959年、Abrahamson²⁾は Allen 等によつて示された“さざ波”現象を説明するためシリコンパテに水のジェット流を噴入させるという実験を行ない、同時に鋼弾丸と銅板を用いて衝撃実験を試み、このとき明らかに銅と銅の間に接合(圧着)が生じていたことを報告している。爆発圧着の現象は爆発成型の段階でダイスに成型しようとする金属が接合しているようなことから知られていた。(Holtzmann Rudeshausen)³⁾。工業的に爆発圧着を利用することを試みたのは Pearson, Davenport, Duval, Baes⁴⁾ 等である。

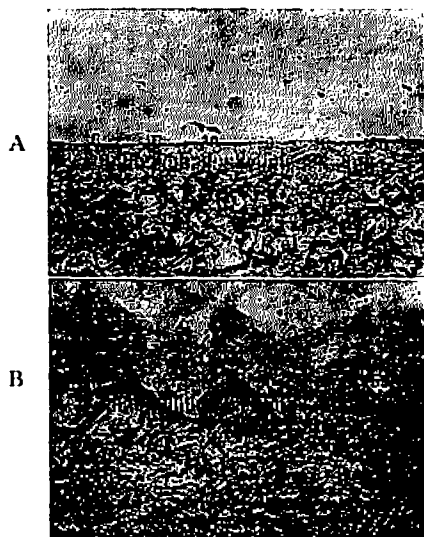
近年、化学工業の発展に伴い化学装置が複雑多様化し、技術的、経済的な観点から材料置換の様相が著しくなつてきている。すなわち、これまで技術的な面から利用され難かつた各種の特殊材料——例えばチタニウム、ジルコニウム、タンタルなどは異種金属との溶接が出来ない——を利用したより高級で安価な装置材料が必要となり、ここに「新しいライニング構造、クラッド板」が要求されるようになった。旭化成ではこれらの要求に応えるため、爆薬が爆発するときのエネルギーを利用する爆発圧着法に着目し、昭和37年頃から三菱製鋼K・Kの協力を得て全面爆発圧着法の開発に、また日立製作所の協力で部分爆発圧着法の開発に着手した。そして各種耐食・耐熱金属クラッドの製造法並びに、ライニング機器の製作施行法(ハブ法と称している)として実用化した。その他、爆薬による高エネルギー速度加工法には、成形、拡管、圧搾、表面硬化等多種に分類され、その応用範囲は無限に拡大されつつある。

それではこの爆発圧着クラッドにはどのような特徴・利点があるのだろうか? 現在までに確認された主なものをあげると^{5) 6)}:(イ) 圧延法では不可能で

あつたチタン、ジルコン、タンタルなどの金属やその合金を含め、ほとんどあらゆる金属のクラッド板を圧着製作できる。(ロ) ライニング材の厚さはクラッド全面に対して均一である。(ハ) 強力な冷間加工であり、金属組織に熱影響を与えない。(ニ) 板の組合せ(板厚比)の巾が大きい。(ホ) 両面クラッドが可能である。(ヘ) 種々の熱処理を施した鋼板又は鍛造品にクラッドができる。(ト) 剪断力が大きいので苛酷な成型加工も可能である。(チ) 耐食・耐熱・耐摩耗など苛酷な使用条件に耐え得る良好な特性を示す。(リ) 一方、爆発圧着クラッドの製造には爆薬を使用する関係上当然爆発音が問題となり製作可能な板の大きさは技術的な理由によるよりもむしろ、その環境に非常に制約を受けるがその範囲内であるならば、形、面積共に自由に選択出来る。

2. 爆発圧着の原理と方法

ロール圧着したものと、爆発圧着したものの界面を比較してみると図1に示したように前者の場合は比較的平面的であるのに対し、後者の界面は波状を呈していることがわかる。この相異は何を意味し、又波状模



A : ロール法
B : 爆発圧着法

図1 圧着界面

昭和41年12月23日受理

* 旭化成工業株式会社 坂ノ市工場 大分市宇里

様生成の機構はどのようなものであるのか？現在のところこの機構についてまだ明確な解答は得られていないが、くさび形物体、又は円錐体物体の衝撃挙動を観察することによりある程度の知識は得られる。図2は著名な Munroe 効果又は Neumann 効果と呼ばれる現象である。爆薬が円錐体の頂点0に達してからは頂

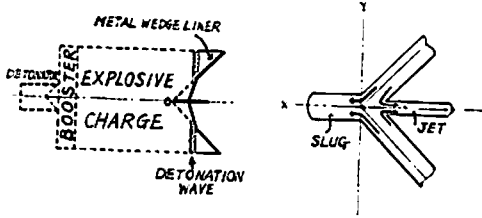


図2 爆轟中の円錐弾

点0は軸に沿って右方に移動し、頂点背後に於いては衝撃した円錐体のきせ金の外壁によって生成した金属スラグが左方に流動する。きせ金内壁は両側からしめつけられ、右方に押し出される恰好となり、スラグよりも速いスピードのジェットとなり噴出する。このジェットこそが装甲板、コンクリート、その他構造物に対して著しい貫通力を有するものであり⁹⁾、爆発圧着に際してはこの金属ジェットの生成が圧着力の源と考えられている。この金属ジェットによって生成した圧着界面の独特な波状模様を説明するために Abrahamson はグリース又はシリコン・パテに水を高速で噴き入れ、ジェットを生成し金属に於ける圧着模型を作った。その模型を簡単に図3、図4に示す。図3-aは、衝撃角 α なる模型配置図、図3-bは動座標に変換してAを固定点とみなした。図3-cは $V/\tan \alpha$ なる流れが $V/\sin \alpha$ なる流れに衝撃合流してゆく様子である。

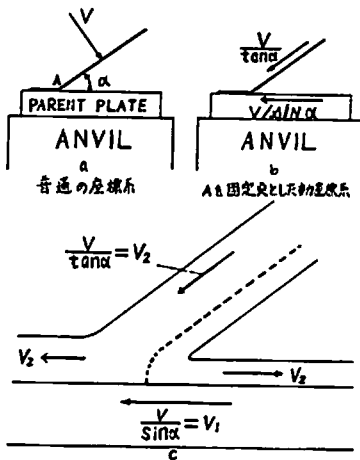
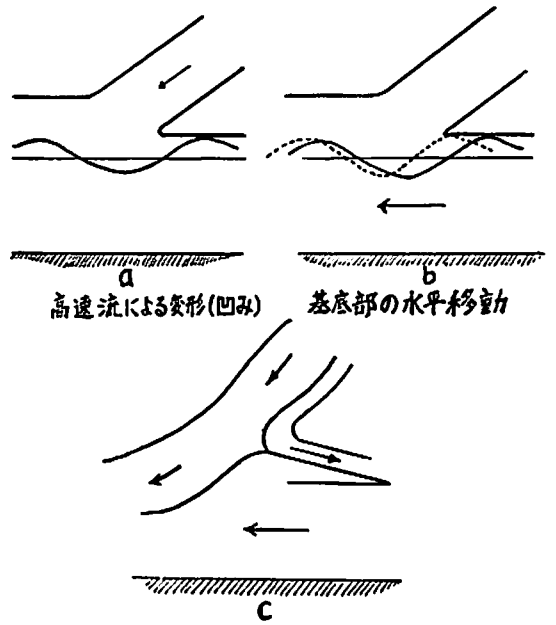


図3 爆発圧着の原理



永久体の生成

図4 波生成機構

図4-aは非圧縮性流体の最初は平面である基底部に高速流が衝撃した場合であり、ためにその部分が凹み、両側の表面が盛りあがる。図4-bでは絶えまない高速流の噴入のために基底部は高速流下の凹みの上流側に移動し、ために高速流は絶えず新しい基底部に谷を作り続ける。従つて、絶えず左方への流れが生ずることになる(図4-c)。実際に爆発圧着をする方法は図5に示すように合材と母材とを適当な間隔 h を隔ててある角度をもたせて設置し合材C上に緩衝板Bを介して爆薬Aを全面に装置し、爆薬を一端Eから起爆させると全面に及んで接合する⁹⁾。

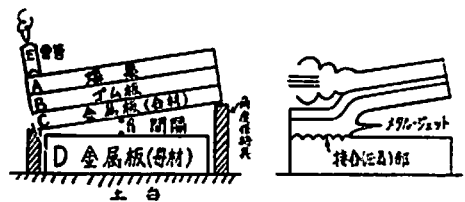


図5 爆発圧着の方法

3. 圧着条件と耐食性

クラッド板は主として耐熱、耐食材料として利用されるが、なかでも耐食材料としての役割が大きい。爆発圧着クラッドは爆薬の強烈なエネルギーを利用してのために高速・高圧力で塑性変形した材料が脂化していないだろうかということが当然問題となつてく

る。爆発加工が材料の耐食性に及ぼす影響については多くの文献には爆発加工によって耐食性が劣下するようなことはない旨報告されているが¹⁰⁾、他方では爆発加工によってステンレスとは考えられない程度にまで耐食性が劣下し、又疲労限界もかなり減少するとか、圧着前に十分に沸騰した硝酸と硫酸鉄溶液で処理したSuS 28には圧着によっても全く耐食性が劣下しないとか¹¹⁾、いまだにまだ不明瞭な点が残されている。圧着材の構造用材料として要求される各種機械的性質の詳細についてはいずれ稿を改めて報告することとし、本報では圧着材の耐食材としての重要性に鑑み過去に報告された事実再度検討を加える必要を感じ、ここに圧着材について広く耐食性を検討すること

とした。

(1) 5% 硫酸沸騰液による腐食試験

各種の圧着条件でステンレス 28 (SuS28)+軟鋼 (SS 41) クラッドを製作し圧着条件が耐食性に及ぼす影響について検討した。腐食方法は SuS28+SS 41 クラッドの母材部 (SS41) を完全にセーバーで切削除去し、合材 (SuS 28) をミリング切断して 30×50 mm 角としたものをサンドペーパーで 800 番まで仕上げ研磨したものを供試片とした。腐食度の評価は 5% 硫酸沸騰液中で 1 期=6 時間として 5 期まで計 30 時間について各期毎の腐食減量を測定し、この値を腐食速度 (mm/Year) に換算したものを採用した。供試片の条件及び腐食結果を表 1 に示す。

表 1 5% 硫酸沸騰液腐食試験

No.	供試片条件				侵食度 (mm/year)					
	薬量	薬種	保護物	覆土	1 期	2 期	3 期	4 期	5 期	全平均
1	1.5	A	無	無	27.132	30.973	31.012	32.852	33.099	31.014
2	1.5	A	ゴム板	有	27.651	31.045	31.997	32.316	33.412	31.284
3	1.5	B	無	有	43.246	44.653	46.412	46.062	48.997	45.874
4	1.5	B	ゴム板	無	38.041	42.114	45.301	45.039	45.324	43.164
5	3	B	ゴム板	有	56.518	65.079	71.369	66.963	50.902	64.166
6	3	B	無	無	54.426	63.399	61.568	61.998	64.739	61.226
7	3	A	ゴム板	無	31.425	31.997	33.463	34.526	34.616	33.205
8	3	A	無	有	32.099	33.452	36.970	35.361	37.973	35.171
9	素 材				28.945	29.712	31.446	32.005	31.431	30.708

- 注：1) 表中は 1.5, 3 は各々適正薬量の 1.5 倍, 3 倍量を使用して圧着したことを示す。
 2) 薬種 B は薬種 A の約, 倍近い爆速を有する。
 3) 合材表面保護材としてゴム板の有る場合と無い場合を採用した。
 4) 覆土とは爆薬の上面を適当な厚みの土で覆うことである。覆土のある場合は、無い場合に比べて爆薬の反撥力を有効に利用することができるが、反面、材料特性に及ぼす影響が懸念されるのでここにとりあげた。

SuS 28 は 5% 硫酸沸騰液中で激しい点食 (ピッチング・エロージョン) を受けている。この実験は H₂。直交配列表に組み込まれており、検定の結果薬種については危険率 1% で有意性が認められ、薬量については危険率 5% で有意性が認められた。保護物・覆土については有意差は認められなかった。又、主なるものについて交互作用も検定してみたが交互作用は認められない。この結果、薬種と薬量は圧着材の耐食性に大きな影響力を持ち、若しく不適當な爆薬種、あるいは過大なる薬量は耐食性劣下の大きな要因となり、この両者の適切なる選択が重要であることが判明した。この原因については明らかではないが、たぶん塑性変形による歪の発生と関連するものと考え

(2) 65% 硝酸沸騰液による腐食試験

還元性腐食環境の代表として (1) では硫酸を用いたが、次に酸化性腐食環境の代表として硝酸を用い、(1) と同一条件の供試片について検討した。試験方法は ASTM 規格: A262-63 に準じている。結果を表 2 に示す。

この場合も各条件の間に腐食量の差はあるが (1) の場合ほど薬量・薬種による耐食性への影響は顕著でなく有意差は認められなかった。ここで特に注意すべきは (1) の場合とは逆に圧着材の耐食性が素材とほとんど差がないか、またはやや向上していることである。

ハステロイ C のハブ圧着材を 20% 硝酸沸騰液、20% 硝酸沸騰液中で腐食試験した場合についても同

表 2 65% 硝酸沸騰腐食試験

No.	供試片条件				侵食度 (mm/year)					
	薬量	薬種	保護物	覆土	1 期	2 期	3 期	4 期	5 期	全平均
1	1.5	A	無	無	0.1879	0.1911	0.2447	0.3353	0.4402	0.2798
2	1.5	A	ゴム板	有	0.1853	0.1837	0.2444	0.2747	0.3515	0.2479
3	1.5	B	無	有	0.1828	0.1851	0.2346	0.2916	0.3156	0.2420
4	1.5	B	ゴム板	無	0.1836	0.1864	0.2459	0.3435	0.4340	0.2787
5	3	B	ゴム板	有	0.1765	0.1869	0.2244	0.2609	0.3161	0.2238
6	3	B	無	無	0.1858	0.2031	0.2539	0.2963	0.3593	0.2597
7	3	A	ゴム板	無	0.1739	0.1635	0.1930	0.2297	0.2823	0.2093
8	3	A	無	有	0.1710	0.1762	0.2080	0.2556	0.3234	0.2268
9	炭		材		0.1826	0.2141	0.2971	0.3986	0.4685	0.3121

注：1期=48時間

様の現象が報告されている¹²⁾ので参考までに図6に示す。(1)の場合と(2)の場合とでは、材料は爆発圧着という同一の現象によって耐食性に対して同等の効果を受けているはずであるが、結果的に(1)の場合は劣下し、(2)の場合はそれとはむしろ逆の現象を呈するというを説明し得る共通の原因についてはよくわからない。ただ、ステンレス鋼は酸化性環境では安定な酸化皮膜を生じて耐食性がきわめて優秀であるが、還元性環境では皮膜が不安定で腐食が激しいことがあることを付け加えておく。

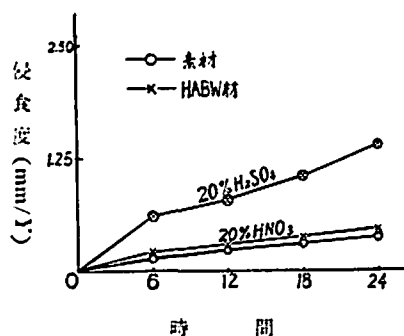


図 6 ハステロイ C 沸騰腐食試験

(3) 各種圧着クラッドの耐食性

圧着材にはそれぞれ材料固有の適正薬量(限界薬量)があり、この薬量を超過するものについての耐食性を(1)、(2)で検討したが、ここではこの適正薬量で圧着した材料の耐食性を各種材質、腐食環境で検討した。腐食液は常温又は沸騰状態とし、1=24期時間を4期まで計96時間行つた。結果を図7に示す。

総じて、爆発圧着材の内には若干耐食性の劣下するものも認められるが、適正なる圧着条件で製作され、適正なる腐食環境で使用されるならば、素材のそれと比べて実用上何ら懸念すべき点はなく、これはすでに

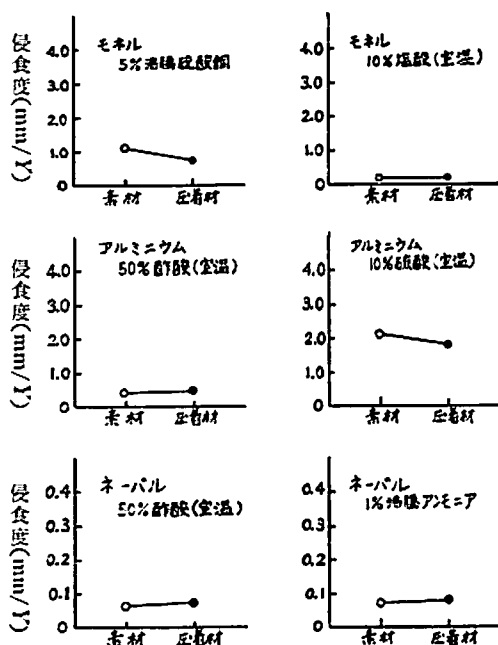


図 7 各種環境に於ける爆発圧着材の耐食性

多くの欧文にも報告されているとおりである。

(4) 圧着界面の耐食性

図8のように一度圧着した合材上にさらに圧着を施行し他の面に対して特に爆発圧着界面が腐食を受けやすいかどうかを定性的に検討した。腐食前の台材圧着界面は肉眼では全く識別できない。腐食結果を表3に示す。



図 8 圧着界面耐食試験片

表3 圧着界面の耐食性

供試金属	腐食液	腐食時間	腐食状況
SuS27+SuS27+SS41	5%硝酸沸騰液	連続72時間	かなり腐食を受けたが、界面は全く侵食されておらず、肉眼では界面は識別できない。
SuS36+SuS36+SS41	30%硫酸沸騰液	同上	非常に腐食され激しい点食を生じ、使用に耐えない状態であり圧着界面もかなり侵食されているが、表面層の腐食ほどひどくない。
ABP+ABP+SS41	1%塩酸沸騰液	同上	界面は肉眼で識別できるが侵食は受けていない。他の表面層の腐食に比べれば界面の腐食量は問題にならないほど少ない。

2度打ちした圧着界面には何ら問題となることは見出されなかつた。ただ単に2金属が密着しているだけなら界面はもつと激しい腐食を受け、ひどい場合には剝離するようなことになる筈であるが、そんなことが全くないのは界面が十分に接着していることを示している。

(5) 圧着時の間隔の耐食性への影響

米国 E. I. Du Pont 社が行っているような所謂“平行法”に於いて合材と母材との間隔が耐食性にどのような影響を与えるかを検討した。供試片は SuS32 (4mm)+SS41 (12mm) クラッドを大・小2種類の間隔で製作し (1) の場合と同様の手順で切削・研磨を施したものを 5% 硫酸沸騰溶液中で1期=6時間を5期まで合計30時間の腐食試験をした。その結果を図9に示す。図中(イ)は間隔の大きな場合で、12mm、(ロ)は間隔の小さな場合で2mm、(ハ)は素材の場合を示している。なお、SuS32の5%硫酸沸騰溶液中の腐食減量規格値は JIS G 4305 に於いて、6.04 mm/year (5.5g/m²/hr) 以下と定められている。こ

の結果より圧着間隔は小さいほど耐食性には好ましい結果をもたらすものと考えられる。間隔の大小は圧着材の塑性変形の度合いに関連するものと考えられるので耐食性への影響もこの辺に原因があるものと思われる。いずれにしても腐食度の差は僅少で懸念するほどのものではない。

4. 考 察

以上の実験より爆発圧着材の耐食性は通常、素材とほとんど変わらないことが確かめられたが、圧着条件が著しく不適當の場合は、腐食環境によつては非常に劣化することがわかつた。腐食現象自体が非常に微妙なところがあり遺憾ながら現在まだ我々は爆発衝撃を受けた材料の腐食挙動について納得のゆく解答を下すに至っていない。爆発衝撃の現象を直感的に判断すれば金属材料には爆発圧力のために圧縮残留応力が存在しているように思えるが、これは材料全面に同時に圧力が加わつた場合に考えられることであつて通常の爆発加工の場合にはあてはまらない。例えば、爆発圧着に於いては2、爆発圧着の原理と方法のところの説明したように一端より起爆された爆轟は強大な圧力を材料に加え、塑性流動をおこしながら“進行”してゆくのであつて、これは例えれば図10の左図に相当すると考えてよいであろう。図10の(a)は板が軽く圧延される場合であつて、圧縮残留応力が生じる。図10(b)は

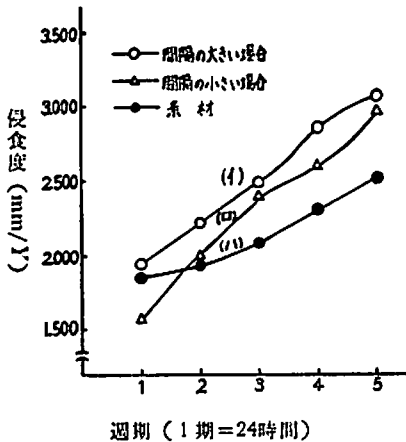


図9 間隔の耐食性への影響

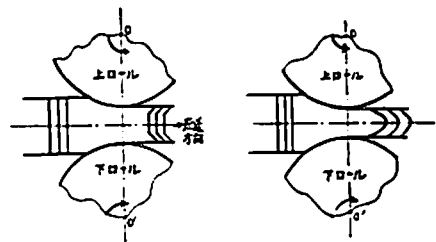


図10 板材圧延の場合の残留応力 (a) 軽く圧延する場合 (b) 強く圧延する場合

板が強く圧延される場合であつて (a) とは逆に表面は引張残留応力、中心部は圧縮残留応力となる¹³⁾。すなわち「爆発圧着材には引張残留応力が存在する」という仮定もあながち根拠のないものではないだろう。しかるに一般に引張残留応力は材料の性状に良い影響を与えない場合が多く、逆に圧縮残留応力は好ましいことが多い。ショット・ピーニングはこの性質を利用して表面に圧縮残留応力を発生させようとするものである。金属の化学的性質、とくに腐食におよぼす残留応力の影響はきわめて顕著であり、我々が顕微鏡検査をするときに結晶粒界とか変形帯が他の部分より急速に腐食され、又結晶粒界は析出物が存在する場合はとくに腐食作用が明瞭になることはよく知られている。このような局部的に歪エネルギーが大きく、これが化学反応に要する活性化エネルギーの一部として供給される。従つて、一般に残留応力を有する金属材料部品は腐食を受けやすい状態にある。腐食が起こると金属の表面に腐食生成物が吸着し、この生成物の性質いかんでは表面層と基地との間に残留応力が発生する。この発生した応力が既存の残留応力に加算され、表面層に亀裂や孔食が発生するようであれば腐食が一層進行することが予想される。勿論逆にこの生成物の表面層のために腐食が阻止されたり、不動態化する場合もある。これに外力が加われば腐食が一層促進され応力と腐食の両者によつて破壊が起こり、これが応力腐食割れと呼ばれるものである。外力の状態が繰返し荷重の場合は腐食疲労割れと呼ばれる現象がおこる。以上のことをあわせ考えれば「爆発加工材の耐食性が劣下するのは爆発加工によつて引張残留応力が発生するためであろう」と考えられる。爆発量が多ければ多い程、発生する引張残留応力も大きくなり、耐食性劣下の程度もはなはだしくなるわけである。又単に爆発量だけの問題にとどまらず、たとえ同一薬量であつても材料の塑性変形の度合いが大きく、それが引張残留応力を発生させることにつながれば当然、耐食性は劣下すると考えられる。従つて文献に報告されているように爆発加工によつて耐食性が非常に劣下する場合は、適正なる加工条件を無視しこれらの選択に考慮を払わなかつたために生じたものと考えられる。

5. 結 論

耐食挙動はその腐食材質、腐食環境、あるいは腐食

状態(常温、沸騰、高温等)によつて非常に多岐に及んでおり、とりわけ圧着材の耐食挙動についてはなお不可解な点も残されているが、ここに行つた一連の耐食実験から大旨の傾向を知ることが出来るものと思う。本実験の結論を次に掲げる。(1) 適正なる圧着条件による圧着材には素材に比べて実用上懸念すべき耐食性の劣下は認められない。(2) 圧着条件が適当でない場合は耐食性が劣下する可能性があるが、これは材料に引張残留応力が発生することによると考えられる。最後にこの実験を補佐された阿武 勝、前原良男両君に感謝致します。

文 献

- 1) Allen, W. A., Mapes, J. M., and Wilson, W. G.: J. Appl. Phys., Vol. 25, p. 675, 1954.
- 2) Abrahamsan, G. R.: J. Appl. Mech., Vol. 83, p. 519, 1961.
- 3) Holtzmann, A. H. and Rudershausen, C. G.: Sheet Metal Ind. Vol. 39, p. 399, 1962.
- 4) A. S. Bahrani, Crossland, B.: Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 179, p. 265, 1964~65.
- 5) J. J. Douglass: ASTM Technical Paper, SP. 65-94.
- 6) 佐々木、富安: 溶接学会誌, 第35巻, 439頁, 昭和41年.
- 7) Explosive Bonded Clad Metal に関する情報抄録: (Du Pont 社)
- 8) G. Birkhof, D. P. MacDougall, E. M. Pugh and G. I. Taylor: J. Appl. Phys., Vol. 19, p. 563, 1948.
- 9) 滝沢: 金属材料, 第6巻, 61頁, 昭和41年
- 10) 例えば, Andrew Pocalyko: Materials Protection, p. 10, June, 1965.
- 11) C. A. Verbraak: Metal Progress, January, 109, 1963.
- 12) 爆発圧接実験: (藤永田 エンジニアリング 株式会社)
- 13) 黒田: 共立分版 (昭39~5)

Corrosion Resistance of Metals Welded by Explosives

by Kouroku Hoshi & Yu Takizawa.

It had been reported by some early investigators in this field that corrosion resistance of some metals may be reduced by explosive working operations. This report discusses causes for these effects and presents some possible remedies.

Then we have concluded that corrosion resistance of explosive welded metals, when it was produced by specific welding conditions, are so excellent as its of solid metals. But, in some instances, decreases took place, when welding is made under unsuitable explosive conditions for each metals. With our present knowledge, we are inclined to believe that it is due to residual tensile stress.

(Asahi Chemical Industry Co., Ltd. Sakanoichi Plant)

研究論文

爆発成形の機構について

桜井武尚・金本光郎*

1. はしがき

ここ数年来、にわかに火薬類の各種金属加工面への関心が高まって来ている。その工法も、成形、圧接、硬化、圧縮、抜管等、まことに多彩なものがある。ここでは、とくに爆発成形について、実際の規模の実験を行い、その技術の本質を考え、今後の方向について論じたい。

爆発加工法が活発に研究されはじめたいきさつは、大きく分けると、つぎの三点があげられよう。

- 1) 機械工学の立場から
- 2) 金属材料の立場から
- 3) 火薬技術の立場から

近時、ロケットや人工衛星等の飛しょう体の製作問題に刺げきされて爆発成形がとり上げられた事は初期の多くの文献に見られるところであるが、たしかに、通常、雄型、雌型の両者を要する従来の工法にくらべいづれか一方だけで足りる爆発成形は、小數多種生産に有利であることはいうまでもない。加えて、宇宙時代の各種要求にこたえて開発された種々の新合金、新金属の加工においても、火薬類を使用する事は変形を高速にし、その結果として生ずる、有利、不利の現象

に対して応変のエネルギー分布を行なう工夫も容易である。このような観点から爆発成形が試みられたのは、1957年頃と考えられるが、1959年にはかなり大部の文献が出まわっている。

爆発成形は火薬類の各種媒体内の爆発現象を利用するため、成形速度は夫々の条件で種々の差はあるにせよ、従来の工法にくらべたしかに高速で行われる。したがって、金属材料が高速荷重下におかれたときの挙動は重要な問題である。この最初のきっかけは軍事的問題もあつて、Kármán から Duwetz につづく一連の基礎的研究がつづいたが、(1948~1953)、歪速度に及ぼす金属の性質は具体的な工学的立場からも、Watts (1959)、Austin (1960)、桜井、塚田 (1960)¹⁾ が実験した。初期のこの実験はさらに、福井、河田、清野 (1961~)²⁾、によりなお意欲的な研究が行なわれている。

一方、火薬技術の立場からは、岩石爆破以外の目的にその用途を開発する事は、今後の一つの課題であり、成形に火薬類を使用する事は着想としては古くからあつたし、金属の圧着、硬化等の現象も火薬技術者の体験の中に潜在していた。したがって、上記の時代的背景を得るに至つて、爆発成形法は、火薬技術の立場からも関心が大きくなって来ている。そこで、な

*昭和42年1月9日受理

* 日本油脂株式会社武蔵工場 愛知県武蔵町